

Dispositifs de prélèvement des eaux

par **Hugues GODART**

Ingénieur civil des Mines

Ingénieur en chef à la Générale-des-eaux

1. Prélèvement des eaux de surface	C 5 190 - 2
1.1 Débits prélevés	— 2
1.2 Aménagement des points de prise	— 2
1.2.1 Captage et qualité des eaux.....	— 2
1.2.2 Cours d'eau	— 2
1.2.3 Lacs et réservoirs	— 4
1.2.4 Cas particuliers	— 5
2. Captage et extraction des eaux souterraines	— 5
2.1 Eaux souterraines	— 5
2.2 Terrains	— 6
2.2.1 Circulation des eaux souterraines.....	— 6
2.2.2 Différents terrains	— 6
2.3 Sources. Dispositifs de captage	— 7
2.3.1 Sources.....	— 7
2.3.2 Captages.....	— 7
2.4 Nappes proprement dites	— 8
2.4.1 Différentes nappes.....	— 8
2.4.2 Caractéristiques d'utilisation	— 9
2.4.3 Captage des eaux souterraines	— 12
2.4.4 Réalimentation artificielle	— 15

On distingue traditionnellement les prises d'eau superficielle et les captages d'eau souterraine ; dans la réalité on peut se trouver devant des situations moins tranchées. Par exemple, une source (exutoire superficiel naturel) peut être alimentée par de véritables nappes souterraines soumises aux lois du mouvement des eaux en milieu poreux ou, au contraire, n'être que la sortie à l'air libre de véritables rivières souterraines régies par les lois d'écoulement à surface libre. A contrario dans de nombreux endroits, notamment dans les grandes plaines alluviales, on utilise des puits ou des forages au voisinage immédiat des berges d'un cours d'eau, l'eau extraite provenant presque directement d'un écoulement superficiel.

1. Prélèvement des eaux de surface

1.1 Débits prélevés

Le distributeur d'eau, ayant déterminé ses besoins, doit obtenir l'autorisation de prélèvement des autorités compétentes (cf. article [C 4 190] *Alimentation en eau potable. Besoins et ressources* dans ce traité) selon la Loi sur l'Eau de 1992, et notamment ses décrets d'application 93-742 et 93-743 du 29 mars 1993. Les Agences de l'Eau participent à la fixation des débits de prélèvements autorisés en fonction du régime hydrologique du bassin versant et de la régularisation éventuelle du débit des cours d'eau. Le volume maximal annuel étant fixé par une autorité externe, le distributeur d'eau peut éventuellement constituer une réserve de régularisation qui lui soit propre. Dans le cas le plus fréquent, la réalisation de barrages-réservoirs se fait sous la tutelle d'une autorité régionale ou dans le cadre d'un syndicat d'utilisateurs divers ; on se trouve alors ramené au cas précédent où le distributeur doit finalement négocier une possibilité de prélèvement en fonction de ses besoins actuels et futurs. Si les études hydrologiques proprement dites ne sont pas du ressort des distributeurs, ceux-ci doivent porter toute leur attention sur les modalités techniques du captage.

1.2 Aménagement des points de prise

1.2.1 Captage et qualité des eaux

Dans un cours d'eau comme dans un réservoir naturel ou artificiel (lacs, étangs, barrages réservoirs de grande capacité), la qualité des eaux est loin d'être homogène, aussi bien en ce qui concerne les matières en suspension (boues, algues, micro-organismes) qu'en solution. Le choix de l'emplacement du captage, la possibilité de modifier le point exact de puisage au sein de la masse d'eau superficielle pourront avoir une influence notable sur la qualité des eaux prélevées et, par conséquent, sur les difficultés et le coût des traitements de correction qui doivent leur être appliqués.

1.2.2 Cours d'eau

1.2.2.1 Études préalables

Pour une raison évidente, on cherche toujours à placer une prise d'eau en amont des rejets polluants. Si les autorités compétentes et notamment les Agences de l'Eau ont une bonne connaissance du niveau de pollution, il est indispensable au distributeur d'eau, aussi bien pour la protection de l'utilisateur que pour faciliter la résolution de ses futurs problèmes de gestion, de procéder à une étude fine de la qualité de l'eau aux différents points de puisage envisagés et en amont de ces derniers. Ces études doivent porter sur plusieurs cycles annuels ; il faut donc les entreprendre dès qu'un prélèvement d'eau de surface est préconisé ou simplement envisagé ; une telle étude ne doit pas se borner à une série (même longue) d'analyses (même complètes) au droit des points possibles de captage. Elle doit chercher à appréhender les variations spatiales et temporelles de la qualité des eaux aux points de décharge des affluents et des rejets. Elle doit être renforcée par une enquête détaillée allant très en amont, concernant les sources potentielles de pollution. De telles études longues et relativement coûteuses peuvent souvent être subventionnées par les autorités de tutelle et par les Agences de l'Eau. Elles peuvent d'ailleurs faire intégralement partie du coût des travaux dont elles seront une étape intermédiaire, au même titre que

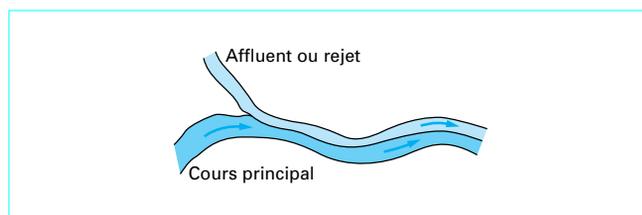


Figure 1 – Cours d'eau

des relevés topographiques ou des études d'ingénierie, et être ainsi couvertes partiellement par des subventions.

Un point important vise la connaissance de la répartition transversale du débit solide et de la pollution au droit du point de prise et en amont de celui-ci.

Un rejet ou un affluent ne se mélange que très progressivement au flot du cours d'eau récepteur ; il est fréquent de constater, en aval du point de confluence (ou de rejet), un écoulement parallèle de deux flots de qualités différentes (figure 1).

Exemple : la jonction du Rio Negro, aux eaux noires, et du Rio Solimões, aux eaux ocre, à Manaus au Brésil est bien connu.

1.2.2.2 Réservoirs d'effacement

Les études citées ci-avant peuvent conduire à prévoir, entre le cours d'eau et l'adduction proprement dite, des réservoirs d'effacement et/ou de traitement. Il sera revenu sur cet aspect dans l'article [C 5 200] *Alimentation en eau. Traitement des eaux de distribution*. Il s'agit de l'effacement des pointes de pollution des cours d'eau (pointes saisonnières ou pointes accidentelles). De tels ouvrages, propres aux distributeurs d'eau, sont généralement conçus à partir de considérations visant la qualité des eaux brutes polluées, mais peuvent également servir de réserve pour les périodes d'étiage. C'est pourquoi leur capacité peut varier de un ou deux jours de consommation moyenne à quelques mois, ou même plusieurs années.

1.2.2.3 Ouvrages de prise

Ils sont très divers et leur réalisation dépend beaucoup des conditions locales (terrain, profondeur du cours d'eau, forme et nature des berges, etc.).

Ils peuvent aller du cas le plus simple d'un puisard de prise creusé dans la berge et communiquant avec le cours d'eau par un orifice muni d'une grille fixe à des ouvrages beaucoup plus complexes prélevant au milieu du cours d'eau, par le fond, avec des dispositifs de dégrillage mécanique à nettoyage automatique (cf. article [C 5 200] *Alimentation en eau. Traitement des eaux de distribution*). En première analyse, on peut les classer en :

- prises au voisinage immédiat de la berge ;
- prises en pleine eau ;
- prises dans le fond ;
- prises flottantes.

■ Le **premier type** est adapté aux rivières présentant une profondeur suffisante à proximité de la berge. Il comporte une structure schématisée dans la figure 2 avec différentes variantes : une ou plusieurs chambres, station de relèvement incluse ou séparée. Les orifices de prélèvement sont munis de grilles (à nettoyage manuel ou automatique). Quand le charriage est important, l'ouvrage comprend des chambres de dessablage et éventuellement des tamis à nettoyage automatique. Les dimensions des différentes chambres sont déterminées de façon à permettre la mise en place et le décuvement aisés des appareillages et équipements, et également en fonction des vitesses d'écoulement recherchées dans la chambre de dessablage et autour de la crépine d'aspiration. Ces paramètres doivent être définis, dans chaque cas d'espèce, à partir des considéra-

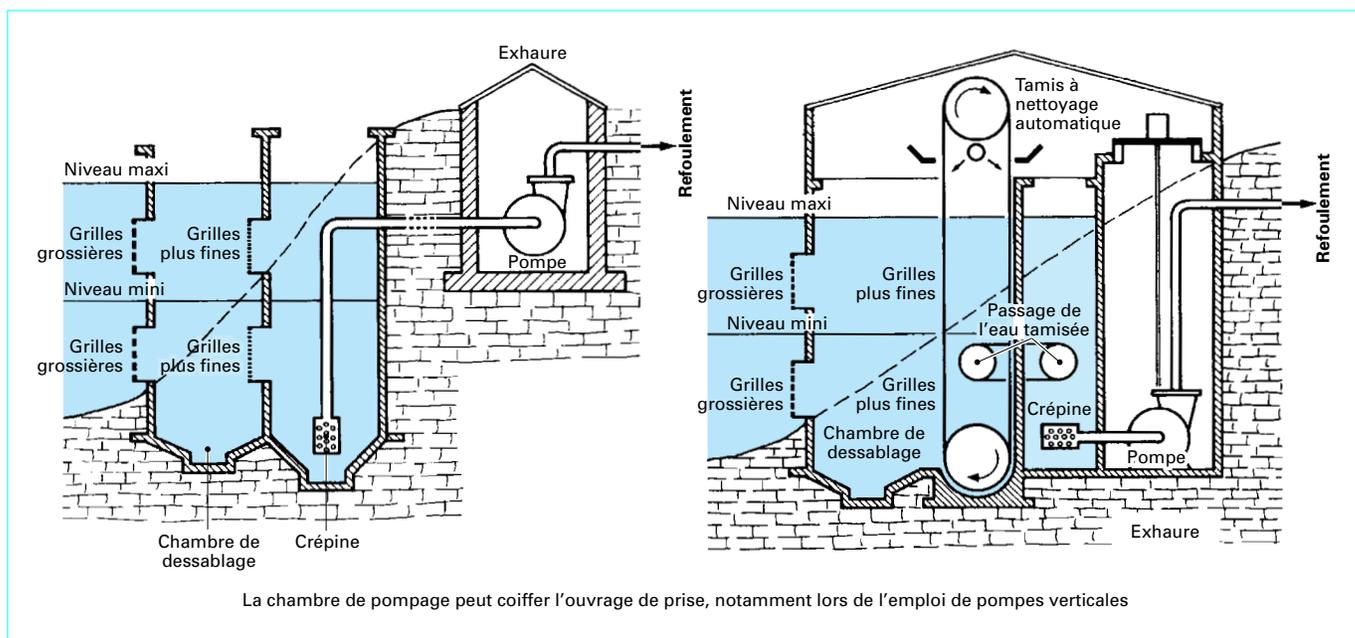


Figure 2 – Ouvrages de prise d'eau au voisinage de la berge

tions que l'on trouvera dans les articles *Mécanique des fluides* du traité Sciences fondamentales, [B 4 405] *Aménagements hydroélectriques* du traité Génie mécanique, [C 5 200] *Traitement des eaux de distribution* et [C 5 220] *Traitement des eaux usées urbaines* de ce traité. Une attention particulière sera portée à la chambre d'aspiration des pompes de façon que soient évitées la formation de vortex et l'apparition de la cavitation.

Enfin, les variations de niveau du cours d'eau peuvent conduire à prévoir des prises à des niveaux successifs et à choisir une station de relèvement permettant d'assurer un bon rendement avec des hauteurs manométriques totales variables ; on se reportera à l'article [D 3 490] *Moteurs asynchrones. Choix et problèmes connexes* dans le traité Génie électrique.

Dans le cas de puisage de faible débit ou, plus généralement, lors de conditions favorables telles que rivières bien régulées à très faible débit solide, le dispositif de puisage peut se trouver très simplifié tel qu'il est schématisé dans la figure 3.

Le schéma de la figure 3a est bien adapté aux cas où le charriage de fond est inexistant.

■ Le **deuxième type** (berge à très faible pente) se différencie par le renvoi de l'orifice de prise d'eau loin de la berge en un point où la profondeur d'eau est suffisante. De toute façon l'ouvrage en berge reste nécessaire ; il est semblable à ceux schématisés dans la figure 2, la grille grossière étant renvoyée à l'embouchure de la conduite de liaison. La figure 4 schématise un mode de réalisation de l'embouchure, pour laquelle de nombreuses variantes peuvent être envisagées en fonction des contraintes liées au régime du cours d'eau ou à l'utilisation de ce dernier par les autres usagers (navigation, flottage, etc.). La nature et la stabilité du fond de la rivière et des couches sous-jacentes jouent un rôle déterminant dans le choix de la solution à adopter pour la construction de cette embouchure, dont la conception présente des analogies avec celle des piles de pont.

■ Le **troisième type** tend à utiliser le matériau du fond du cours d'eau comme tamis grossier ; c'est une solution qui ne se rencontre que dans de petites installations (figure 5).

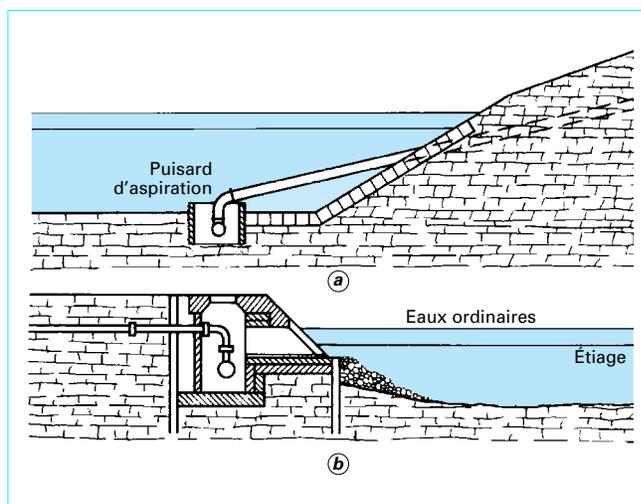


Figure 3 – Dispositifs simples de captage dans les lacs, étangs, rivières, fleuves : type de prise d'eau

Pour le prélèvement de gros débits, on pratique la technique des puits ou des forages situés immédiatement près de la berge du cours d'eau, dans les alluvions. Les puits ou les forages rayonnants sont alors particulièrement bien adaptés au problème posé.

Dans certains cas, l'ouvrage de prise comprend une installation de microtamisage pour l'arrêt du zooplancton et du phytoplancton.

■ Le **quatrième type** convient à des installations provisoires ou durables, pour des cours d'eau plutôt peu profonds, à niveau rapidement variable, et pour des débits limités. La prise est constituée d'un caisson flottant avec crépines d'aspiration. La canalisation de liaison est articulée à la prise flottante et aux installations fixes sur berge. On peut relever le caisson pour nettoyer les crépines (figure 6).

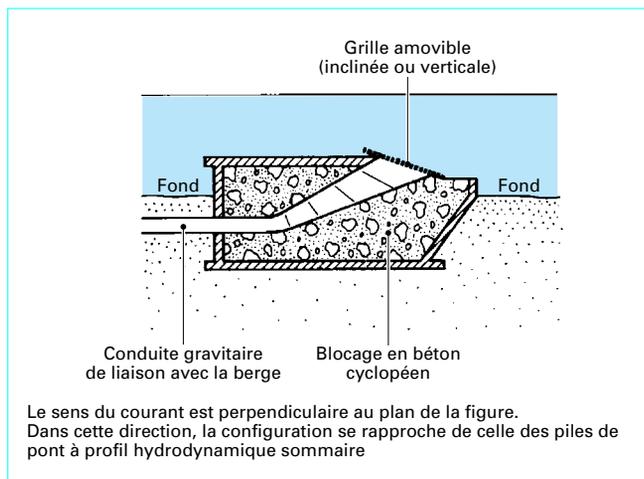


Figure 4 – Embouchure d'une prise d'eau en pleine eau

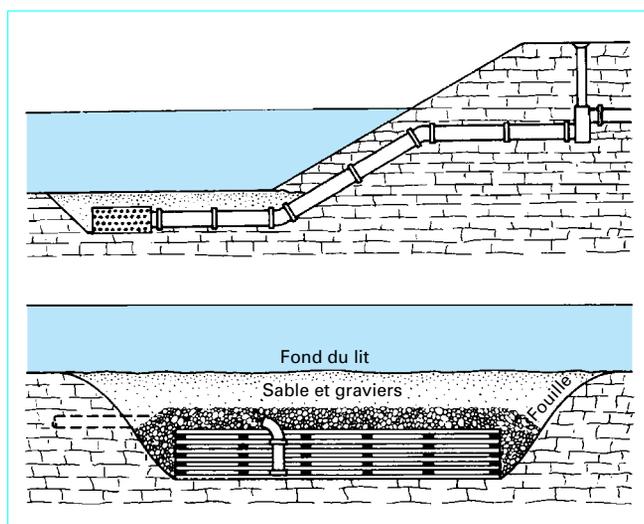


Figure 5 – Différents types de prise d'eau

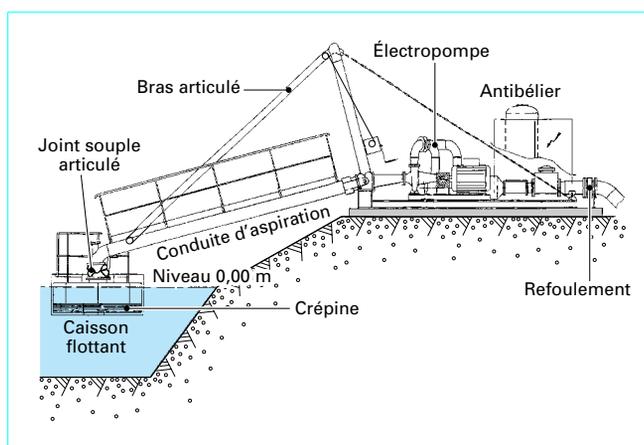


Figure 6 – Prise d'eau flottante

1.2.3 Lacs et réservoirs

1.2.3.1 Études préalables

L'importance des masses d'eau stockées nécessite la prise en compte :

- de la stratification des masses d'eau ;
- des courants de densité et des courants préférentiels.

Ces deux aspects du comportement de l'eau varient selon les saisons et influent sur la qualité de l'eau prélevée. Pour chercher à en diminuer l'importance, on joue, chaque fois que cela est possible, sur le dispositif d'alimentation de la réserve. De toute façon, pour disposer d'un moyen de sélection de la qualité de l'eau prélevée, on aménage, dans la mesure du possible, deux ou plusieurs ouvrages de prise, en prévoyant systématiquement pour chaque ouvrage un dispositif pour prélever en cours d'année l'eau à la hauteur de son choix. L'aide d'un hydraulicien, pour des études sur modèle réduit (en ce qui concerne les courants préférentiels) et les conseils d'un limnologue sont utiles lors des études préalables. L'examen du comportement de retenues situées dans le même bassin, quand elles existent, peut être riche d'enseignements.

1.2.3.2 Eutrophisation et désoxygénation

Ces deux notions sont particulièrement importantes dans le cas des lacs et retenues utilisés pour la production d'eau potable, par les problèmes de goûts, d'odeurs, de septicité, de fer, manganèse, ammoniacque, etc. qu'elles induisent. Le traiteur d'eau rencontre ces difficultés plus particulièrement pendant les saisons les plus chaudes, mais des phénomènes de développements violents de microphytes de type *diatomea* apparaissent, dès certains mois de mars, dans les pays tempérés comme la France dans divers types de retenues. Rappelons que l'eutrophisation se traduit notamment par des proliférations algales extrêmes. C'est-à-dire que doivent être réunis un certain nombre de facteurs (température, activité lumineuse...) et en particulier les constituants chimiques des microalgues : azote, carbone, phosphore, dans des proportions relatives de l'ordre de 10/100/1. Dans la nature, on trouve presque toujours suffisamment de carbone ; c'est donc sur l'azote et le phosphore que l'on doit agir pour maintenir une qualité d'eau équilibrée.

L'autre aspect est celui de la désoxygénation de l'hypolimnion (zone la plus profonde d'une retenue). Les graphiques de la figure 7 concernent une retenue d'une profondeur moyenne de 10 m ; ils montrent bien les variations de température et d'oxygène dissous en fonction de la profondeur et des périodes de l'année. Lorsque l'oxygène dissous vient à manquer, il y a lieu d'en réintroduire par aération, brassage des couches d'eau, etc. Les divers procédés imaginés à ce jour ont toutefois des effets limités, malgré des investissements non négligeables et des dépenses d'énergie souvent élevées. Le choix de la profondeur de la prise à utiliser n'est en même temps que rarement satisfaisant, et ce sera au traitement de potabilisation d'être particulièrement performant.

1.2.3.3 Ouvrages de prise

Quand la retenue n'est pas profonde, ils sont analogues aux ouvrages de prises en rivière. Les prises avec conduite de liaison se rencontrent fréquemment, l'ouvrage de blocage et de protection de cette conduite est souvent émergé dans sa partie supérieure. Pour les retenues profondes, on utilise de préférence des tours avec des orifices de prise à plusieurs niveaux. Il est recommandé, dans le cas où un microtamisage à la prise n'est pas prévu dès l'origine, d'envisager avec le concepteur de génie civil la possibilité d'aménagement d'un tel appareillage. Cela est surtout important dans le cas de réserves de grande profondeur dont l'évolution dans le temps ne peut être prévue avec beaucoup de certitude, deux retenues du même bassin hydrologique pouvant présenter des caractéristiques limnologiques différentes. La figure 8 montre des réalisations de prises dans des réservoirs naturels ou artificiels.

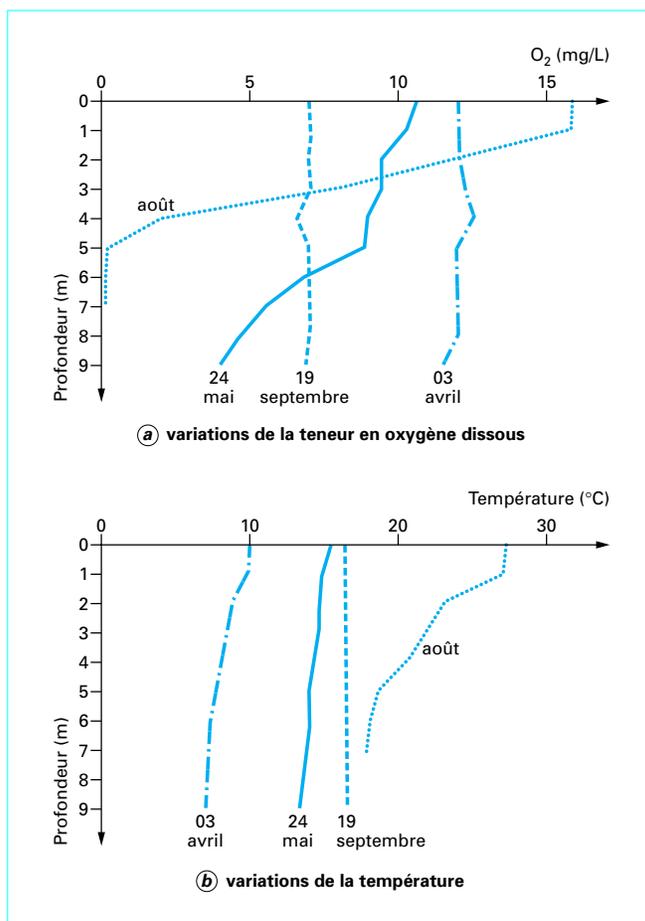


Figure 7 – Variations de la teneur en oxygène dissous et de la température en fonction de la profondeur

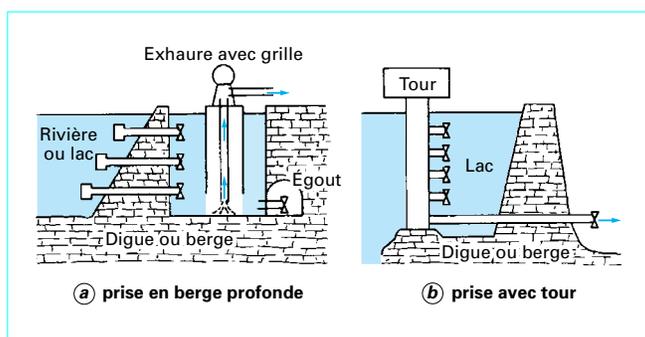


Figure 8 – Prise d'eau dans des réservoirs naturels ou artificiels

1.2.4 Cas particuliers

1.2.4.1 Prise d'eau sur torrents

Les dispositifs sont analogues aux dérivations d'alimentation des conduites forcées en montagne (cf. article [B 4 405] *Aménagements hydroélectriques* dans le traité Génie mécanique). Les torrents se caractérisent souvent par les variations considérables (et quelque-

fois brutales) de leur débit et par un charriage de matériaux granuleux grossiers (sable et galets). Le débit dérivé pour une alimentation en eau potable est souvent voisin du débit minimal d'étiage tout en n'étant qu'une très faible partie du débit des hautes eaux ; l'ouvrage de dérivation aura quelque analogie avec un déversoir de crues tout en assurant le maintien d'un niveau suffisant de charge sur les ouvrages de prises proprement dits en basses eaux ; tout le dispositif doit rester autocurable à tous les régimes de la rivière vis-à-vis du charriage. Une bonne connaissance des variations du régime hydrologique est nécessaire et il est bon de faire appel, pour le dessin de l'ouvrage, à un hydraulicien qui saura faire face aux différentes contraintes mentionnées ci-avant. Des solutions prévoyant des seuils ou des canaux Venturi juxtaposés ou imbriqués peuvent, par exemple, apporter un moyen de surmonter les difficultés. En amont de la prise d'eau proprement dite, des dégraveurs et des dessableurs doivent être aménagés.

1.2.4.2 Prise d'eau sur rivières à très fort débit solide vaseux

Dans certains pays (en Afrique du Nord en particulier), les cours d'eau, au moment des crues, se caractérisent par des transports solides vaseux très importants se décantant lentement. L'ouvrage de prise est alors conçu comme un déboureur recevant un débit très supérieur (10 fois par exemple) aux besoins ; le ralentissement dans l'ouvrage permet de recueillir en surface un débit moindre (1/10 par exemple) qui, bien débouillé peut être traité dans une station traditionnelle ; le reste du flot boueux, légèrement concentré, retourne par gravité à la rivière plus en aval. La mise en œuvre des **déboueurs à plaques autocurables** peut trouver là une application particulièrement bien adaptée (cf. article [5 200] *Traitement des eaux de distribution* dans cette rubrique).

1.2.4.3 Rivières charriant des glaçons microscopiques en formation dans une masse en surfusion (fraisil)

Dans les pays froids, la vitesse du courant au début de l'hiver favorise l'état de surfusion de l'eau en écoulement et empêche la formation rapide de la couche superficielle de glace ; les grilles et tamis des prises sont colmatés par des strates de glaçons microscopiques très abondants (c'est le phénomène du fraisil). Pour faire face à cette difficulté, on crée un bras artificiel où l'eau s'écoule lentement, le fraisil remonte à la surface et de la glace superficielle protectrice se trouve très rapidement formée. La prise proprement dite est située en bout de bras. Ce bras (qui doit alors être curé périodiquement) joue le rôle d'un prédécanteur pour les rivières à débit solide grossier non négligeable.

2. Captage et extraction des eaux souterraines

2.1 Eaux souterraines

On distingue les eaux d'origine météorique et les eaux juvéniles. Les eaux juvéniles, qui prennent naissance par synthèse sous haute pression et très haute température pour la première fois au niveau de l'écorce terrestre, n'intéressent pas les distributeurs d'eau : elles semblent peu importantes.

Les eaux d'origine météorique, qui ont leur origine dans l'infiltration des eaux de pluie, sont classées en eaux superficielles qui ressortent à la surface après un cheminement de durée relativement courte et en eaux profondes, pratiquement immobiles ou qui ne circulent qu'à des vitesses très faibles. Les eaux profondes, appelées quelquefois fossiles, se situent à des profondeurs diverses pouvant

dépasser 10 km ; elles ne peuvent, en dehors de cas ponctuels, intéresser le distributeur d'eau du fait qu'elles ne se renouvellent pas, tout au moins à l'échelle de la vie humaine.

Nota : il existe toutefois des cas intermédiaires, comme celui de la nappe albienne du Sahara, où l'eau artésienne ou semi-artésienne permet l'alimentation d'oasis ou de centres pétroliers. La profondeur des forages y dépasse le kilomètre et certains hydrogéologues pensent que l'eau qui y est prélevée aujourd'hui provient de chutes de pluies sur l'Atlas saharien à l'époque de Charlemagne.

Les prélèvements d'eau souterraine sont ponctuels (sources, puits, forages) et les volumes prélevés sont de très loin supérieurs à la fraction infiltrée et non rééaporée des précipitations sur la surface entourant immédiatement le point ou l'ensemble des points de prélèvement. La limite des possibilités de prélèvement dépend, par conséquent, du volume d'eau disponible immédiatement autour du point de captage, du mouvement local de l'eau dans le terrain entourant le captage et du mouvement de l'eau entre ce dernier et les terrains, pouvant se situer fort loin, qui constituent le bassin récepteur des précipitations, qui finalement réapparaissent ou sont soutirées artificiellement au captage.

Le problème que doit résoudre le distributeur d'eau est celui de l'optimisation d'un système où interfèrent les caractéristiques du dispositif de captage, la nature du terrain où il doit être implanté, la nature des terrains du bassin de réalimentation, le volume de réalimentation ; de surcroît, ce dernier varie suivant les années et dépend également des conditions de prélèvement.

2.2 Terrains

2.2.1 Circulation des eaux souterraines

Les eaux souterraines se déplacent sous l'effet de la gravité, le gradient de pression étant soit naturel, soit provoqué artificiellement par un pompage ou un drain. La nature laminaire ou turbulente de l'écoulement et les pertes d'énergie sont liées directement à la structure de la roche aquifère. Un écoulement dans un milieu de sable fin est très différent de celui intervenant dans une roche disloquée en grandes fissures.

Il faut également distinguer :

- la zone d'alimentation ;
- la zone de circulation ;
- la zone d'accumulation ;
- la zone de sortie (ou de captage).

Compte tenu de l'objet de cet exposé les aspects liés aux zones d'alimentation et de circulation ne seront pas développés. Ils relèvent de la compétence des études hydrogéologiques fines auxquelles il faut toujours procéder dans une étude d'ensemble d'une ressource souterraine, étude qui n'a pas à être prise en charge par un distributeur d'eau, mais qu'il aura à connaître avant d'établir son propre projet.

La zone d'accumulation, qui intéresse au premier chef les utilisateurs, voit tous les vides du terrain remplis d'eau ; c'est une zone de saturation appelée souvent **nappe souterraine**. Cette nappe peut être une nappe d'interstices fins (tels que ceux d'un terrain sableux) ou une nappe de réseaux (calcaires très fissurés par exemple). Une variante de cette dernière sorte est constituée par la circulation en veines séparées (calcaires compacts fissurés).

Dans certains cas, des zones non saturées peuvent intéresser le distributeur d'eau, notamment dans les massifs karstiques où se créent des sortes de ruisseaux ou rivières souterraines dont la découverte est sinon aléatoire tout au moins difficile ; mais elle est fructueuse quand elle est positive.

2.2.2 Différents terrains

On se reportera utilement à l'article [C 204] *Géologie* du présent traité.

2.2.2.1 Roches volcaniques

Les matériaux volcaniques meubles (cendres, lapilli) peuvent être assimilés, du point de vue hydraulique, aux terrains sédimentaires meubles (§ 2.2.2.6). Les basaltes sont fissurés et l'eau y circule sous forme de veines.

Nota : Lapilli : fragments de projections volcaniques.

2.2.2.2 Roches cristallines

Elles sont compactes, mais fissurées ; les fissures devenant de plus en plus fermées en profondeur ne peuvent conduire à la formation de nappes. En surface, par contre, ces roches se décomposent en produits granuleux dont l'accumulation locale permet la création de nappes situées au-dessus du substratum cristallin, mais ces nappes sont locales et peu puissantes.

2.2.2.3 Roches métamorphiques

En dehors des zones de broyage ou de décomposition, l'eau se situe dans les diaclases et les fissures. Les terrains sont à peu près imperméables en profondeur. Dans les terrains en élévation, les fissures constituent des drains qui se vident par des sources nombreuses, à débit variable en fonction des précipitations et qui se tarissent rapidement.

2.2.2.4 Terrains sédimentaires compacts non solubles

Il s'agit principalement de grès quartzeux. Ils sont à la fois fissurés et légèrement poreux. Les fissures sont étroites et ne s'élargissent pas par dissolution. La majorité des grès comporte des interstices très fins. Les fissures peuvent conduire à la formation d'une nappe de réseaux. De toute façon, la circulation y sera très lente et les sources naturelles ou les captages auront des débits unitaires faibles, croissant après les précipitations et déclinant ensuite.

2.2.2.5 Terrains sédimentaires compacts solubles

Suivant la compacité de la roche et sa solubilité, les écoulements seront quelque peu différents. Les terrains très solubles (gypse, anhydrites) seront alimentés par des orifices larges de dissolution ou d'effondrement et la circulation se fera principalement par des chenaux. Les sources y seront très abondantes après les précipitations, mais se tariront rapidement.

Dans les calcaires compacts diaclasés, on retrouvera des caractéristiques similaires, la formation d'une nappe continue n'étant pas exclue au niveau de bancs peu fissurés ou d'un horizon argileux.

Dans les calcaires poreux et finement fracturés, la circulation se fera à travers un réseau qui peut coïncider avec une nappe d'interstice si la porosité est continue. Cette dernière sorte de calcaire abrite une ressource abondante et largement utilisée. Les écoulements se rapprocheront de ceux des terrains meubles, mais s'en différencieront en partie du fait de l'existence d'un réseau à côté de la nappe d'interstice.

2.2.2.6 Terrains sédimentaires meubles

Ils constituent par excellence les terrains aquifères classiques. Il s'y forme une nappe d'interstice dont le mouvement sera gouverné notamment par la granulométrie du terrain. Ces terrains se prêtent plus aisément que les autres à la modélisation mathématique. Le comportement hydrodynamique des nappes peut y être appréhendé comme celui d'un milieu à potentiel (filets fluides et courbes isopiézométriques). Les mouvements dans ce type de terrain sont lents et les variations de l'alimentation par les précipitations sont peu sensibles.

2.3 Sources. Dispositifs de captage

2.3.1 Sources

Ce sont les exutoires des nappes et niveaux aquifères souterrains.

On distingue les sources d'affleurement, de déversement, et les sources d'émergence ou de thalweg (figure 9).

2.3.1.1 Sources d'affleurement

Elles se produisent sur les flancs d'une vallée au contact d'un substratum imperméable avec la formation perméable qui lui est superposée. Elles peuvent être masquées par des éboulis.

a) **Grand versant** : si le toit de l'assise imperméable est incliné, le flanc de la vallée qui correspond à la partie la plus élevée du toit est le grand versant. Il est généralement le plus riche en eau et, à ce titre, comporte les sources d'affleurement les plus nombreuses et de plus gros débit.

b) **Petit versant** : l'autre côté de la vallée s'appelle le petit versant, sur lequel les sources ont généralement un débit moindre.

2.3.1.2 Sources de déversement

Les sources de déversement se forment dans des conditions analogues aux précédentes, lorsque les deux versants de la vallée s'ouvrent dans une formation compacte indéfiniment perméable. Il naît alors des deux côtés du thalweg des sources ayant des débits plus ou moins importants et qui, au lieu d'être situées sur une même ligne, prennent jour, au contraire, à des altitudes différentes.

Les résurgences les plus élevées tarissent en premier lieu lorsque l'alimentation du niveau aquifère inclus dans la formation perméable se ralentit.

2.3.1.3 Sources d'émergence ou de thalweg

Elles se forment lorsque le fond de la vallée n'atteint pas la formation imperméable qui sert de substratum à la nappe phréatique, mais lorsque cette formation est néanmoins relativement rapprochée.

Elles sont alimentées par la partie supérieure de la réserve aquifère. Elles tarissent assez facilement.

2.3.1.4 Pseudo-sources : Résurgences. Exsurgences. Sources vauclusiennes. Circulation karstique

Dans les terrains calcaires très fortement fissurés et, de ce fait, perméables en grand (terrains karstiques), il se produit, à la surface et dans le cœur même de la roche, des accidents connus sous le nom de *lapiaz* (cannelures séparées par des arêtes vives), *avens* (puits naturels), *dolines* (entonnoirs parfois occupés par une argile rouge de décalcification appelée *terra rossa*) et autres : bétouires, gouffres, cavernes, grottes, souterrains, toutes cavités qui donnent lieu à une circulation aquifère intense (circulation karstique – initialement étudiée dans la région du Karst ou Carso, en Dalmatie et Herzégovine, région des Causses en France).

Il en résulte des **résurgences** qui ne sont que la réapparition d'eaux préalablement enfouies dans les terrains, des **exsurgences** résultant de l'infiltration directe des eaux de pluie, des **sources vauclusiennes** intermittentes ou non (figure 10).

Ces manifestations aquifères ne sont pas de véritables sources, ni au sens étymologique étroit du mot (du latin *surgere* = surgir), ni surtout au sens hydrologique, mais des réapparitions, en masse, d'eaux enfouies plus qu'infiltrées également en masse dans un terrain déterminé.

Ces eaux n'ont généralement subi aucune filtration naturelle valable. Elles doivent à ce titre être toujours considérées comme suscep-

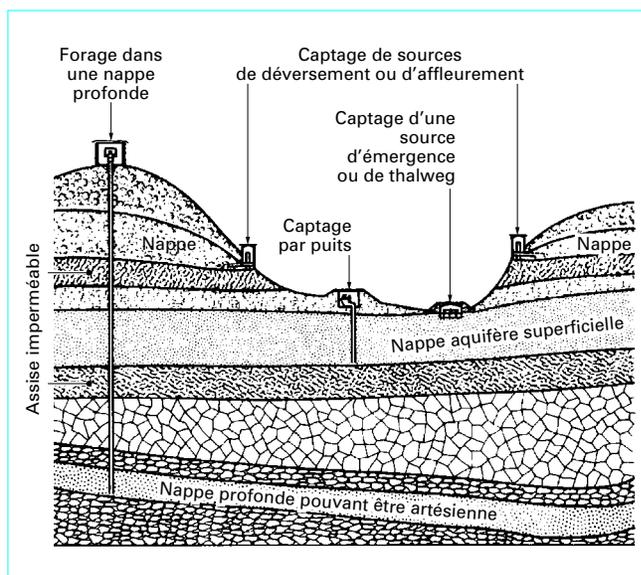


Figure 9 – Captage des sources et nappes

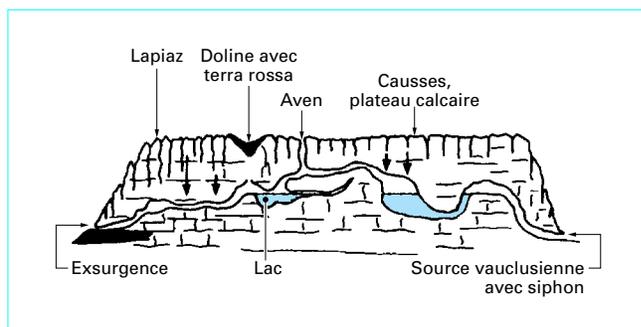


Figure 10 – Circulation karstique. Pseudo-sources

tes au point de vue hygiénique — même et surtout si elles sont d'une limpidité apparente — et relèvent d'un traitement d'épuration.

2.3.2 Captages

2.3.2.1 Captage des sources d'émergence ou de thalweg

Le captage des sources d'émergence se présente assez fréquemment.

Exemple : sources de la dérivation de l'Avre, qui contribuent largement à l'alimentation de la ville de Paris.

Il comporte :

- la **mise à nu de l'émergence** par enlèvement préalable des terres de couverture et, le cas échéant, le débridage des griffons alimentaires ;

- l'**installation** au-dessus des griffons d'un ouvrage étanche qui collecte les eaux dès leur sortie du gisement et permet leur dérivation sur la conduite d'adduction (figure 11) ; cet ouvrage doit recueillir la totalité des filets liquides pour augmenter le volume d'eau capté et pour éviter la naissance ultérieure de courants souterrains vagabonds, susceptibles de mettre accidentellement les eaux

dérivées en communication avec l'extérieur et de faciliter l'introduction dans l'ouvrage de captage des eaux sauvages circulant dans le thalweg (pluies, inondations, crues, etc.) qui sont généralement très fortement contaminées ;

— la prise de mesures spéciales, parfois onéreuses, dans le périmètre de protection, pour l'éloignement des eaux de ruissellement : fossé de ceinture, fossé collecteur, neutralisation des bétouilles, gouffres et marnières et puisards d'absorption, etc.

On doit tendre à effectuer le captage dans le gîte géologique même et, à ce titre, traverser les éboulis et terres de couverture qui peuvent le masquer.

2.3.2.2 Captage des sources d'affleurement et de déversement

Ces sources sont situées à flanc de coteau ; à ce titre, leur captage présente des modalités différant sensiblement de celles des sources de thalweg.

S'il s'agit d'une nappe contenue dans une assise sableuse, reposant sur un substratum imperméable, le captage peut comporter un ou plusieurs drains, dont les dimensions dépendent de l'importance du débit, captant sur toute leur longueur, et chargés d'amener les eaux de la nappe dans une chambre de collecte.

S'il s'agit d'un niveau aquifère à circulation diaclasienne, l'ouvrage de captage peut se rapprocher du type indiqué pour les sources d'émergence, lorsqu'on se trouve en présence de quelques griffons groupés et bien caractérisés. Au contraire, on utilise les galeries de captage disposées de façon à couper un grand nombre des diaclases dans lesquelles s'effectue la circulation souterraine, quand on a affaire à un niveau aquifère d'une certaine étendue.

La forme et les dimensions des drains et galeries peuvent varier à l'infini, depuis celles du modeste tuyau en poterie de 4 cm de diamètre, jusqu'à celles de la galerie maçonnée visitable, ayant plusieurs mètres de hauteur [captage des sources de la Joie (figure 12)].

2.4 Nappes proprement dites

2.4.1 Différentes nappes

2.4.1.1 Nappes libres

La nappe n'est pas close à sa partie supérieure et, à son niveau saturé le plus haut, règne la pression atmosphérique (figure 13). On distingue les nappes perchées qui se vidant par des sources, les nappes soutenues qui sont en équilibre avec une eau de surface (rivière, lac, mer), les nappes à fonds imperméables horizontal, incliné, contre-incliné. La surface supérieure de la nappe (en milieu poreux non fissuré) peut se déterminer par des méthodes numériques telles que celles décrites au paragraphe 2.4.2. La connaissance des conditions aux limites permet, tout au moins d'une façon satisfaisante, en ordre de grandeur, de déterminer le débit d'une telle nappe.

2.4.1.2 Nappes captives

Elles sont comprises entre un fond et un plafond imperméables (ou peu perméables). La ligne piézométrique ne coïncide plus avec le plafond et peut, à certains endroits, se situer au-dessus de la surface du sol (artésianisme) (figure 13c). Les méthodes dont le principe est exposé aux paragraphes 2.4.2.2 et 2.4.2.3 sont néanmoins applicables si l'on dispose de relevés piézométriques en nombre suffisant.

2.4.1.3 Nappes d'accompagnement

Le long d'un cours d'eau, à côté et au-dessous du lit, on trouve presque toujours des formations hydrogéologiques, notamment

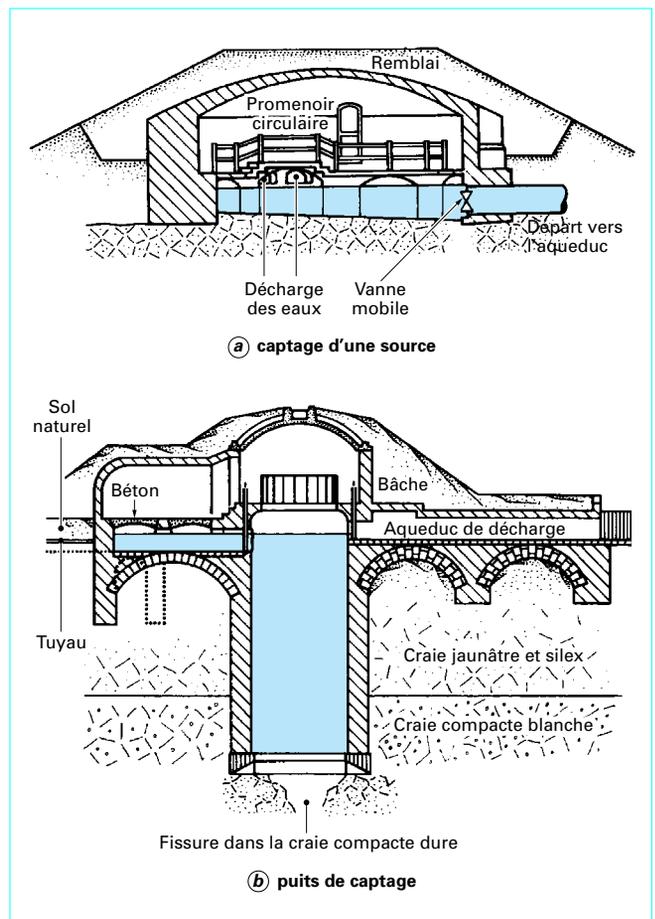


Figure 11 - Captage de source d'émergence ou de thalweg

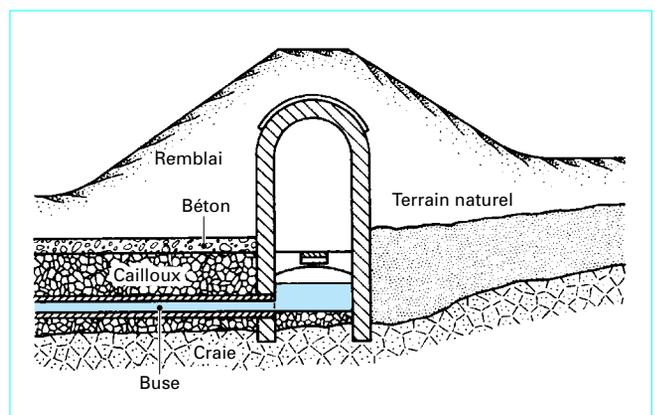


Figure 12 - Galerie de captage

constituées d'alluvions. Il s'établit un équilibre d'échange entre nappe et cours d'eau en fonction de leurs niveaux relatifs et des spécificités des couches de terrains. À certains moments, la nappe alimente la rivière, qui peut elle-même réalimenter la nappe lorsqu'elle baisse (figure 14). On parle de système global aquifère-cours d'eau.

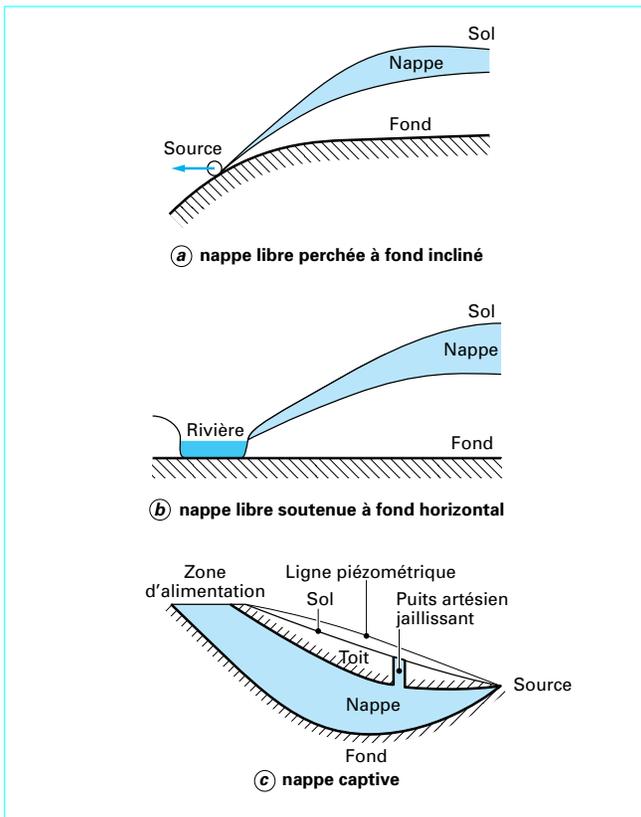


Figure 13 – Nappes

2.4.2 Caractéristiques d'utilisation

Pour évaluer l'intérêt pratique présenté par une ressource d'eau souterraine, le distributeur d'eau s'appuiera sur les critères ci-après :

- volume global d'eau pouvant être soutiré du gisement considéré comme un réservoir statique ; ce volume dépend de la porosité absolue de la roche aquifère, et de sa porosité relative (capacité de stockage) ;
- possibilité de mobilisation de l'eau au travers de l'aquifère qui sera appréciée par la perméabilité et la transmissivité ;
- possibilité de réalimentation de la réserve ;
- qualité de l'eau et sa conformité aux règles sanitaires de l'utilisation, avant ou après un traitement de correction.

2.4.2.1 Porosité et perméabilité

2.4.2.1.1 Porosité

La quantité d'eau stockée dans un aquifère saturé correspond au volume des vides du matériau constitutif ; si l'on rapporte ce volume au volume global, on obtient la porosité absolue ou totale. La signification pratique de ce paramètre dépend de la nature de la roche et de son état : granuleux ou fissuré, homogène ou hétérogène. La fraction utile de ce volume d'eau saturant les vides est celle qui peut être soutirée sous l'effet de la pesanteur ; quand on la rapporte au volume global du matériau (solide et vides), on obtient la porosité effective qui varie de 0 % pour les argiles fines à 30 % pour les sables grossiers et les graviers. Pour bien saisir l'importance de cette distinction, on peut noter qu'une marne argileuse à grains fins

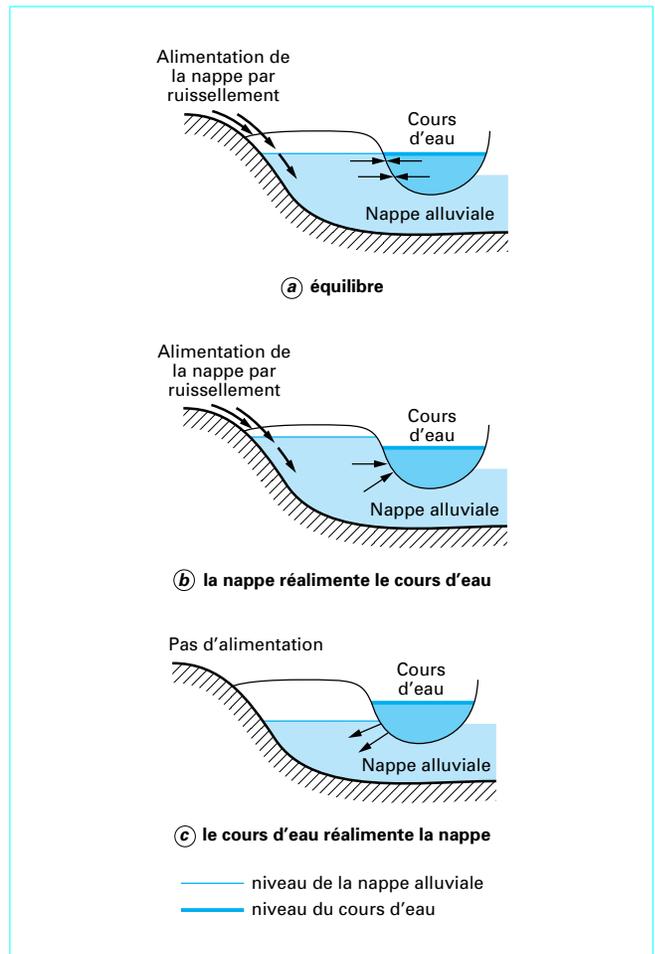


Figure 14 – Échanges entre le cours d'eau et la nappe alluviale

peut accuser une porosité absolue de 30 % pour une porosité effective voisine de zéro. Il faut également souligner que ces paramètres n'ont pas grande signification pratique dans le cas d'aquifères fissurés ou très hétérogènes.

2.4.2.1.2 Perméabilité

La perméabilité K d'une roche aquifère quantifie sa capacité de transmission de l'eau sous l'effet d'un gradient de pression. L'unité de perméabilité (proposée par des pétroliers américains) est le **Darcy** qui est défini comme la perméabilité, sous une viscosité de 1 cPo (10^{-3} Pa · s), qui assure un débit de $1 \text{ cm}^3/\text{s}$ à travers 1 cm^2 sous l'effet d'un gradient de charge hydraulique normal à la surface de 1 atm ($\approx 10^5 \text{ Pa}$). La pression P étant exprimée en hauteur d'eau, les dimensions de la perméabilité sont celles d'une vitesse. L'unité de perméabilité vaut $0,000968 \text{ cm/s}$.

$$V = -K \frac{dP}{d\ell}$$

avec V vitesse d'écoulement,
 $dP/d\ell$ gradient du potentiel (perte de charge par unité de longueur de parcours).

Cette définition est d'une façon évidente liée aux écoulements laminaires et s'applique aux terrains poreux.

■ On a pu expérimentalement relier la perméabilité aux pertes de charges des écoulements laminaires à travers un milieu homogène granuleux de dimension d du grain :

$$K = \frac{1}{a} \frac{gd^2}{v} = \frac{gd^2}{va} = \frac{g}{v} K'$$

- avec a coefficient numérique,
- g accélération due à la pesanteur,
- v viscosité cinématique,
- K' **perméabilité géométrique** ou intrinsèque.

La perméabilité géométrique est une caractéristique du terrain, elle a la dimension d'une surface.

■ Certains hydrogéologues utilisent une troisième forme de l'expression de la perméabilité : le **module de Thiem K** , encore appelé coefficient de perméabilité, dont la définition se rapproche de celle du Darcy mais elle est rapportée au débit et à la surface de vides S' normale à l'écoulement :

$$V = -K'' \frac{dP}{d\ell}$$

Pour les écoulements turbulents qui peuvent s'établir dans les terrains fissurés, la vitesse d'écoulement sera fonction de la racine carrée de la perte de charge et l'on peut définir une **perméabilité turbulente** par la relation :

$$V = -K''' \sqrt{\frac{dP}{d\ell}}$$

2.4.2.2 Écoulements en milieux poreux

2.4.2.2.1 Approche élémentaire de Dupuit en milieu isotrope

Son objet est de représenter le comportement d'une nappe soumise à l'effet d'un drain ou d'un puits. Dans le cas du drain, on est en présence d'un écoulement cylindrique, dans celui du puits d'un écoulement à symétrie de révolution.

Dupuit suppose le régime permanent établi ; la nappe est supportée par un fond imperméable horizontal, le drain ou le puits s'arrêtant au niveau de ce fond (figure 15).

Avec ces hypothèses l'écoulement est bidimensionnel, avec une surface libre de coordonnées x et y telles que la perte de charge soit :

$$dH = \frac{dy}{dx}$$

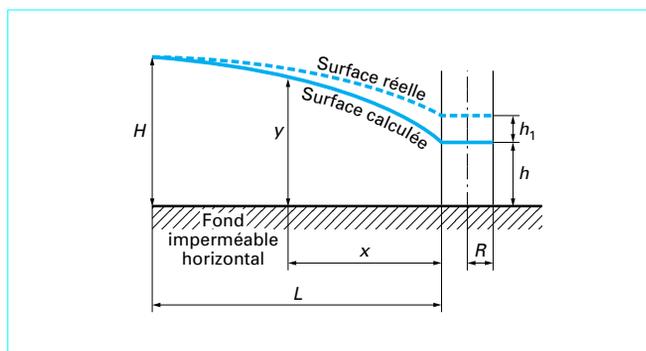


Figure 15 - Drain ou puits. Calcul de Dupuit

Pour le drain :

$$V = K dH$$

$$Q = Ky \frac{dy}{dx}$$

$$Qx = \frac{K}{2} (y^2 - h^2)$$

La directrice de la surface libre est une parabole.

Pour le puits :

$$Q = 2 \pi xy K \frac{dy}{dx}$$

$$Q \ln \frac{x}{R} = K \pi (y^2 - h^2)$$

Si H est la *hauteur naturelle* de la nappe, l'effet du puits ne se fera plus sentir à la distance L telle que :

$$L = R_1 \frac{K\pi}{Q} (H^2 - h^2)$$

L est désigné comme le *rayon d'action du puits*.

Dans la pratique, il a été constaté que la hauteur dans le drain ou le puits s'établissait à une hauteur supérieure à celle de h . Si l'on appelle h_1 la hauteur complémentaire (dite *hauteur de résurgence*) les équations respectives se trouveront modifiées comme ci-après :

Pour un drain :

$$y = h + \sqrt{h_1(x + h_1)}$$

Pour un puits :

$$\frac{(y-h)^2 - h_1^2}{(H-h)^2 - h_1^2} = \frac{\ln(x/R)}{\ln(L/R)}$$

L'ingénieur général Vibert, à qui sont dues les formules visant la hauteur de résurgence, indique que la valeur maximale de h_1 (pour $h = 0$) est obtenue par la relation :

$$h_{1max} = -R \ln \frac{L}{R} + \sqrt{\left(R \ln \frac{L}{R}\right)^2 + H^2}$$

$$Q_{max} = \frac{K\pi H^2}{\ln \frac{L}{R}}$$

ce qui permet de déterminer la valeur de K par des essais de pompage :

$$K = \frac{Q_{max}}{\pi H^2} \ln \frac{L}{R}$$

à condition de disposer de piézomètres autour du puits.

2.4.2.2.2 Généralisation de la loi élémentaire

Les moyens de calcul modernes permettent d'appliquer des raisonnements plus complexes que ceux du paragraphe précédent. Sans vouloir entrer dans le détail des méthodes d'approche, il est apparu utile de donner quelques éclaircissements sur les bases servant d'appui aux bureaux spécialisés qui modélisent les écoulements souterrains en milieux poreux.

Dans un milieu anisotrope, la valeur de la perméabilité dépend de la direction de l'écoulement. La première relation du paragraphe 2.4.2.1.2 peut s'écrire vectoriellement, dans la direction de l'écoulement :

$$\vec{V} = -K \vec{\text{grad}} P$$

La généralisation de cette relation dans toutes les directions conduit à :

$$\vec{V} \cdot \vec{n} = K_n \overrightarrow{\text{grad}} \Phi \cdot \vec{n}$$

avec $\Phi = z + \frac{P}{\rho}$ (ρ = masse volumique).

Le tenseur perméabilité K_n est défini par ses composantes groupées dans la matrice ci-après :

$$K_n = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{xy} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{xz} & K_{yz} & K_{zz} \end{bmatrix}$$

et les composantes de l'écoulement sont données par les relations :

$$-u = K_{xx} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + K_{xy} \frac{\partial \Phi}{\partial y} + K_{xz} \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

$$-v = K_{xy} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + K_{yy} \frac{\partial \Phi}{\partial y} + K_{yz} \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

$$-w = K_{xz} \frac{\partial \Phi}{\partial x} + K_{yz} \frac{\partial \Phi}{\partial y} + K_{zz} \frac{\partial \Phi}{\partial z}$$

On peut montrer qu'il existe des directions d'axe de référence dites directions principales de terrains telles que K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} passent par une valeur de variation minimale et que K_{xy} , K_{xz} , K_{yz} s'annulent. Les composantes de l'écoulement sont obtenues par :

$$u = -K_{xx} \frac{\partial \Phi}{\partial n_1}$$

$$v = -K_{yy} \frac{\partial \Phi}{\partial n_2}$$

$$w = -K_{zz} \frac{\partial \Phi}{\partial n_3}$$

n_1 , n_2 , n_3 étant les trois vecteurs définissant les axes principaux.

Dans un terrain anisotrope, les écoulements ne sont plus normaux aux surfaces équipotentielles.

La modélisation de l'écoulement se fera en s'appuyant sur l'équation de continuité (la somme algébrique des débits entrant dans les faces d'un cube élémentaire est nulle) :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

La combinaison, après dérivation, du système des équations ci-avant, conduit à l'équation de Laplace :

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \text{ dans le cas d'un milieu isotrope,}$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \zeta^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \eta^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \xi^2} = 0 \text{ dans le cas d'un milieu anisotrope}$$

avec :

$$\zeta = x \sqrt{\frac{A}{K_{xx}}}$$

$$\eta = y \sqrt{\frac{A}{K_{yy}}}$$

$$\xi = z \sqrt{\frac{A}{K_{zz}}}$$

Dans le cas d'un écoulement en milieu anisotrope, on est amené à déterminer un écoulement fictif dit écoulement isotrope correspondant à un milieu isotrope de perméabilité A .

La fonction de Laplace se trouve déterminée par les conditions aux limites du domaine d'application ; ces limites seront soit l'assise imperméable de la nappe, soit une surface libre (à pression constante).

Cette approche conduit au calcul numérique et à la modélisation de l'écoulement après détermination des perméabilités et des conditions aux limites.

2.4.2.3 Mesure de la perméabilité

2.4.2.3.1 En laboratoire

On utilisera un perméamètre à l'intérieur duquel est placé l'échantillon de terrain, on sature précautionneusement d'eau l'échantillon en cherchant à éliminer les bulles d'air. La mesure proprement dite consiste à déterminer le gradient de la vitesse d'écoulement, sous une perte de charge donnée. On procède à plusieurs mesures successives pour des valeurs différentes de débit.

2.4.2.3.2 In situ

■ Essai ponctuel

On établit un forage tube étanche muni d'un filtre à son extrémité et l'on pompe l'eau à un débit constant en mesurant le niveau du plan d'eau d'équilibre (figure 16) :

$$K = m \frac{Q}{H}$$

avec Q débit constant de pompage,

H différence entre le niveau de la nappe et le niveau de forage,

m coefficient de filtre (variable suivant les constructeurs).

Si D est le diamètre du forage et ℓ la longueur du filtre, on a déterminé que :

$$m = \frac{\ell \ln(2\ell/D)}{D 2\pi(\ell/D)}$$

pour $4 < \ell/D < 10$

■ Essai avec piézomètres circonscrits

On dispose autour d'un forage muni d'un filtre une série de piézomètres (cf. rubrique « Mécanique des sols » dans ce traité), de préférence dans au moins trois directions différentes, rayonnant depuis le forage. On procède comme dans l'essai précédemment décrit et l'on mesure les rabattements dans les piézomètres situés à des distances variables r de l'axe de forage.

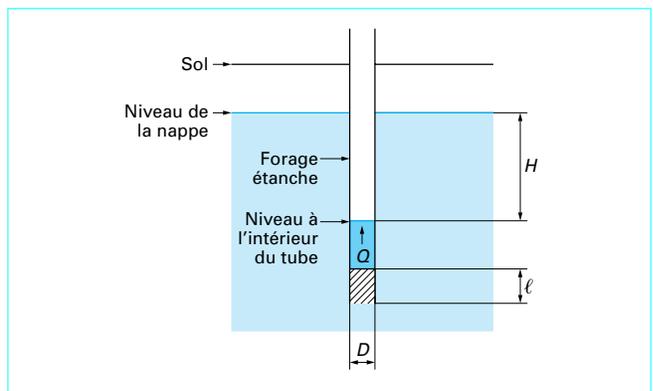


Figure 16 – Mesure de la perméabilité in situ : essai ponctuel

L'application numérique de la méthode décrite au paragraphe 2.4.2.2 dans le cas d'un terrain isotrope donnerait (au signe près) pour une source (puits) linéaire de longueur $\ell = 2c$, le pied des piézomètres étant fixé au niveau du milieu du filtre de forage :

$$\Phi = \frac{Q}{8\pi Kc} \ln \left[\frac{Z+c+\sqrt{r^2+(Z+c)^2}}{Z-c+\sqrt{r^2+(Z-c)^2}} \right]$$

avec Z cote du point de potentiel Φ ,
 r distance du point à la paroi du puits.

Pour $Z = 0$ (plan du pied des piézomètres), on a :

$$\Phi = \frac{Q}{4\pi Kc} \ln \left[\frac{c}{r} + \sqrt{1 + \left(\frac{c}{r}\right)^2} \right]$$

Si le terrain est anisotrope (cas le plus général), on effectue la transformation citée au paragraphe 2.4.2.2 en définissant un écoulement fictif en milieu isotrope tel que :

$$\zeta = x \sqrt{\frac{K_v}{K_x}}$$

$$\eta = y \sqrt{\frac{K_v}{K_y}}$$

$$\xi = Z$$

Le débit fictif à considérer étant :

$$Q' = \frac{K_v}{\sqrt{K_x K_y}} Q$$

avec K_v perméabilité verticale,
 K_x plus petite perméabilité horizontale,
 K_y plus grande perméabilité horizontale.

Pour simplifier les calculs, il est recommandé de disposer deux des séries de piézomètres suivant des directions orthogonales et la troisième suivant la bissectrice. Le calcul permet alors de déterminer, à partir des relevés piézométriques, les valeurs de K_v , K_x et K_y .

2.4.3 Captage des eaux souterraines

2.4.3.1 Dispositions générales

Préalablement au captage, une étude hydrogéologique est indispensable. Elle doit notamment prendre en compte la puissance de la nappe, son renouvellement, les relations entre nappes ou avec la rivière (ou le milieu marin), les risques de pollution... Une modélisation peut être envisagée. On procède ensuite à des forages de reconnaissance et à des pompages d'essai. La qualité de l'eau est alors également examinée. Les forages ne doivent pas interférer les uns sur les autres (figure 17).

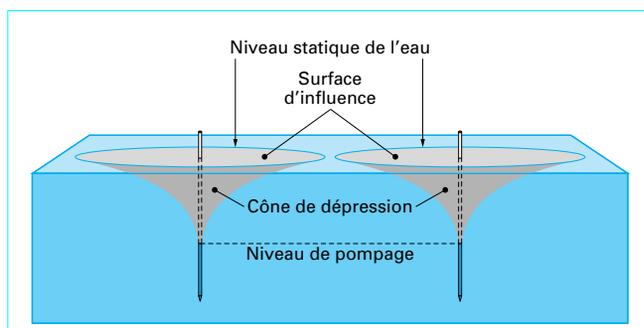


Figure 17 - Disposition de forages

2.4.3.2 Captage des nappes peu profondes

Le captage des eaux des nappes ou niveaux aquifères peu profonds (nappes alluvionnaires ou nappes phréatiques des plaines) peut s'effectuer par puits ou par galerie. Les ouvrages sont d'une conception quelque peu différente suivant qu'il s'agit d'une circulation diaclasienne ou d'une circulation en milieu poreux.

2.4.3.2.1 Circulation diaclasienne

Le gisement se trouvant alors généralement dans un fond rocheux relativement solide, le puits, voire la galerie, peuvent être conçus d'une façon extrêmement simple et ne comporter aucun revêtement au droit de la partie aquifère. Dans le même cas, pour augmenter le débit de l'ouvrage, quand il s'agit d'un puits, on peut adjoindre à celui-ci une ou plusieurs galeries captantes radiales.

2.4.3.2.2 Circulation en milieu poreux (nappes alluvionnaires, en particulier)

Il est indispensable de couvrir la partie captante du puits ou de la galerie d'un revêtement approprié laissant passer l'eau, mais s'opposant à la désagrégation de l'alluvion (figure 18).

Quel que soit l'ouvrage, les précautions indispensables doivent être prises pour empêcher rigoureusement l'accès des eaux extérieures au captage. Si les ouvrages sont ménagés dans une vallée inondable, on doit s'arranger pour que les eaux de crue ne puissent y pénétrer (figure 19).

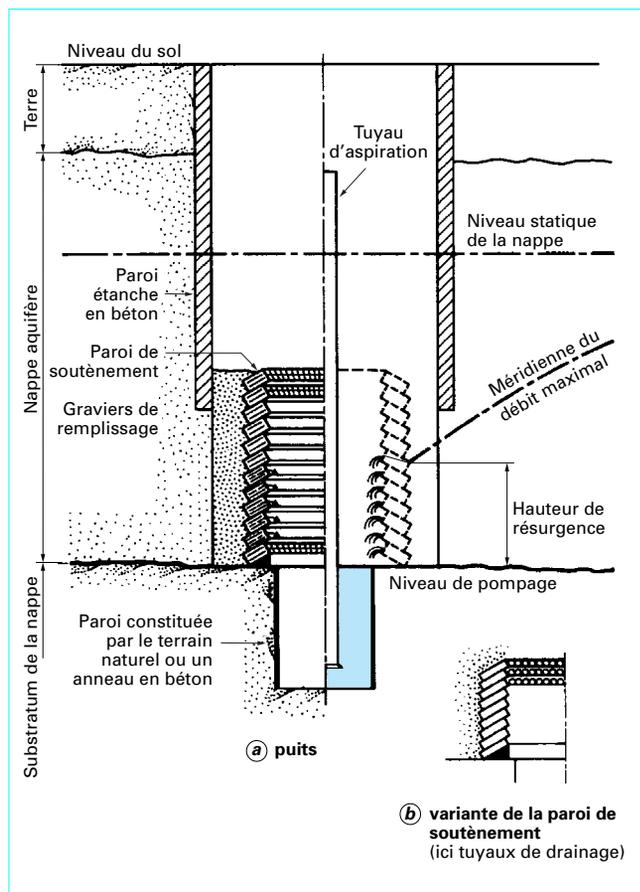


Figure 18 - Puits de captage avec revêtement de soutènement de la partie captante

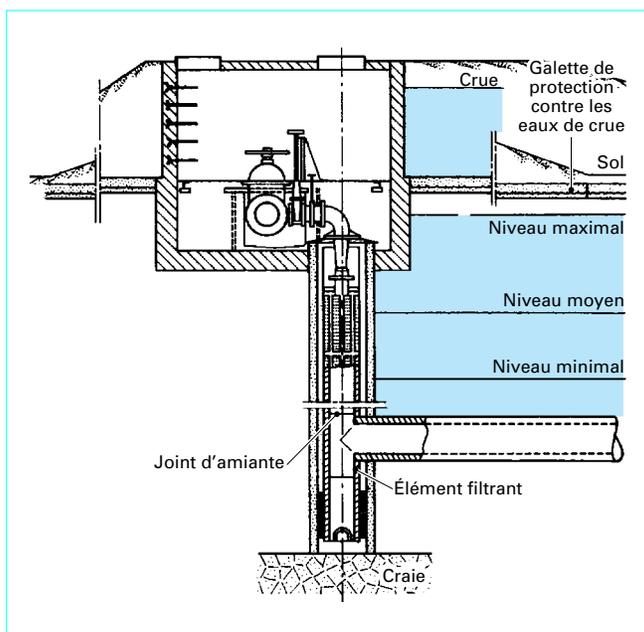


Figure 19 – Protection contre les crues

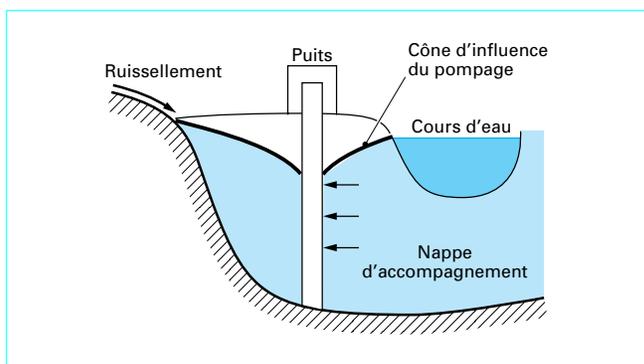


Figure 20 – Emplacement du puits dans une nappe d'accompagnement

Dans le cas des nappes d'accompagnement, il faut choisir l'emplacement du puits et le débit prélevé pour éviter des alimentations quasi directes par la rivière (figure 20) dues soit au cône d'influence du pompage, soit à l'absence d'alimentation latérale de la nappe.

2.4.3.2.3 Puits à drains rayonnants ou à collecteurs rayonnants

Les puits à drains rayonnants (figure 21) étaient connus initialement sous le nom de *puits Ranney*, bien que depuis un certain nombre d'années déjà, il existe plusieurs dispositifs basés sur le même principe, mais qui en diffèrent plus ou moins par la façon dont sont agencés et mis en place les drains de captage.

Chaque ouvrage comporte un cuvelage étanche, d'assez grand diamètre (3 à 4 m) qui s'encastre généralement dans le toit du substratum de la nappe (sauf dans le cas où l'alluvion aquifère est très épaisse), et duquel partent, en différentes directions, des drains captants plus ou moins longs, mis en place de l'intérieur même du

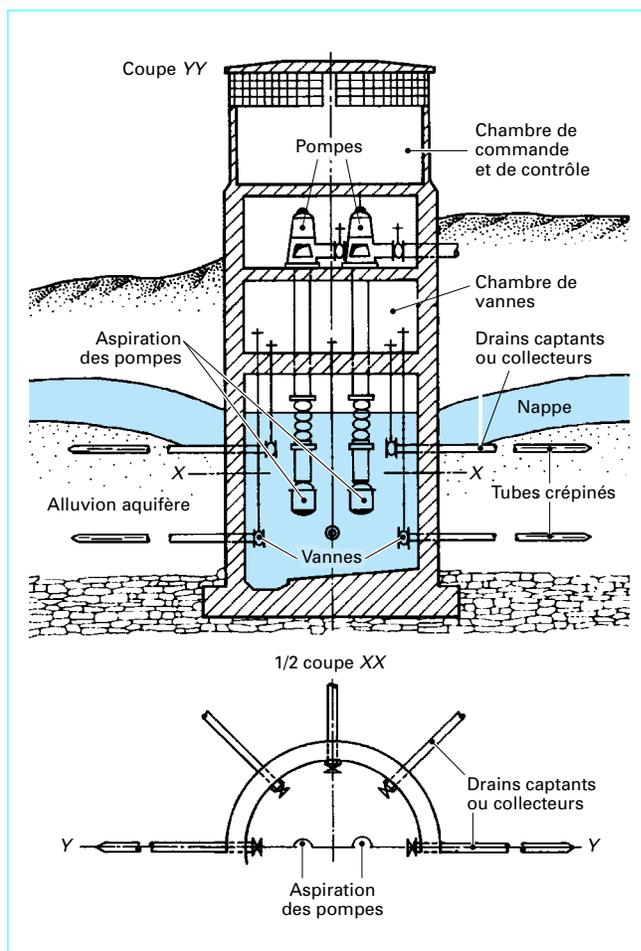


Figure 21 – Puits à drains ou à collecteurs rayonnants

cuvelage et qui débouchent dans ce dernier. Celui-ci joue le rôle d'un réservoir ou plus exactement d'une bêche d'aspiration, dans laquelle puisent les pompes d'exhaure. Chaque drain, à son arrivée dans le cuvelage, se termine par une vanne qui permet d'en limiter le débit. Dans les nappes alluvionnaires très puissantes, les drains peuvent être disposés dans des plans successifs pour permettre un soutirage plus énergique de l'horizon aquifère. Un tel dispositif s'apparente beaucoup plus au drain qu'au puits proprement dit. L'écoulement de l'eau, loin d'être radial, comme dans le puits, est beaucoup plus complexe et échappe, de ce fait, à toute analyse rigoureuse.

Dans le puits classique, au point de vue théorique, une particule liquide est animée d'une vitesse située dans un plan vertical passant par l'axe de l'ouvrage et admettant, dans ce plan, sauf pour celles se déplaçant sur le substratum, une composante horizontale centripète et une composante verticale descendante.

Dans le puits à drains rayonnants, pour toute particule située dans le champ d'action des drains, la vitesse qui l'anime admet une troisième composante dans une direction normale au plan radial sus-visé, remarque étant faite, au surplus, que la composante verticale à laquelle il a été fait allusion peut être montante ou descendante, suivant les positions relatives du drain et de la particule considérée.

Le simple fait qu'il soit possible de multiplier les drains captants et de donner à ces derniers de grandes longueurs pouvant atteindre,

voire dépasser plusieurs dizaines de mètres, rend, en théorie, ce dispositif particulièrement apte à la réalisation de débits importants.

Exemple : un des cas les plus significatifs est celui de l'*Indiana Ordnance Works*, situé en bordure de l'Ohio, dans l'Indiana, à 20 km environ de Louisville dans le Kentucky. L'installation, qui comporte 7 unités, a fourni à une époque de pointe un débit journalier total de 212 000 m³, soit 30 400 m³ en moyenne par ouvrage.

Mais il y a lieu de noter que chacun de ceux-ci comporte un cuvelage de 4 m de diamètre et de 27 m de profondeur et que le gisement aquifère est constitué par une masse de sable et gravier d'une vingtaine de mètres d'épaisseur. Dans un tel cas, l'utilisation de ce type d'ouvrage paraît justifiée, car il a rendu possible, très vraisemblablement, la réduction du nombre de puits de captage. Au surplus, le débit important extrait dans chacun d'eux est tel qu'il autorise un amortissement raisonnable des ouvrages extrêmement onéreux mis en œuvre. Ceci ne signifie d'ailleurs pas que, dans ce cas d'espèce, l'exécution du puits du type classique n'aurait pu être envisagée.

Avec des conditions hydrologiques différentes, le résultat aurait pu être tout autre et il serait évidemment très dangereux, par une extrapolation simple, ne tenant pas suffisamment compte des règles inexorables de la similitude mécanique, d'escamoter en toutes circonstances des résultats du même ordre de grandeur.

L'ouvrage de captage le mieux conçu, le plus rationnel, ne peut donner d'eau qu'autant que le milieu auquel il s'adresse en contient suffisamment ou, plus exactement, autorise, par sa perméabilité et par les sections de passage qu'il offre, une circulation aquifère compatible avec le débit que l'on recherche. À ce titre, il serait vain d'espérer, de nappes analogues à celles qui se trouvent, par exemple, en bordure des rivières du bassin parisien, des débits ponctuels du même ordre de grandeur que ceux auxquels il a été fait allusion ci-avant.

Dans ces derniers cas, il est possible, à dépense égale, d'obtenir un débit au moins équivalent à celui d'un dispositif à drains rayonnants, avec un certain nombre de puits de captage du type classique. L'ensemble sera plus souple en exploitation ; les garanties de longévité seront accrues ; le rendement final et global de l'opération sera moins risqué et souvent meilleur.

L'utilisation du dispositif à drains rayonnants a été proposée pour le captage des eaux en terrain solide diaclasé. Une telle vue se situe à l'opposé des principes qui sont à la base de la conception, de la construction et de l'exploitation du dispositif susvisé, tels du moins qu'ils ont été exaltés par les créateurs de ce dernier. À plus juste escient, il a été proposé aux États-Unis pour capter, au moyen d'ouvrages riverains, les eaux circulant sous le lit même des rivières.

Exemple : il existe d'assez nombreux puits de ce type en France (Mulhouse notamment), en Suisse et en Allemagne (vallée du Danube, Munich, etc.).

2.4.3.3 Captage des nappes profondes

Pour des nappes profondes (au-delà de 50 à 80 m), le système du puits est trop onéreux ou impraticable. On utilise alors des forages ayant des diamètres compris entre 0,10 et 1 m. Si la nappe alimentaire est artésienne et si la pression interne est telle que les eaux remontent naturellement au sol, le captage consiste essentiellement à implanter dans ce dernier un tubage pénétrant suffisamment dans le milieu aquifère. Comme celui-ci est généralement constitué par des sables plus ou moins fins (nappes du Soissonnais, nappes albiennes, aptiennes, néocomiennes, etc.), l'élimination des sables dans le gîte géologique même sera réalisée par l'adjonction d'un dispositif lanterne entouré d'un anneau extérieur en gravillons.

Dans le cas de **nappes non jaillissantes**, il y a lieu de prévoir, en plus du captage proprement dit, une pompe d'exhaure destinée à assurer l'accès des eaux captées à la conduite d'adduction.

2.4.3.4 Exécution des forages et sondages

Elle implique l'utilisation d'un matériel spécial. Pour les ouvrages importants, on emploie de plus en plus des équipements de rotary (forage au tricone) analogues à ceux utilisés pour les sondages de pétrole (cf. article [C 248] *Forages et sondages* dans ce traité).

2.4.3.4.1 Constitution des parois captantes

L'un des problèmes les plus délicats que pose, au capteur d'eau, l'exécution des puits et des forages est celui de la constitution des parois captantes de ces ouvrages. En effet, la couche dans laquelle on capte l'eau est le plus souvent constituée de matériaux à granulométrie plus ou moins hétérogène mais assez fine. L'accumulation de ces fines à proximité du forage entraîne inévitablement un colmatage qui réduira parfois très fortement le débit soutirable.

Traditionnellement, on envisage les parois sous forme de crépines, métalliques ou non, comportant des petits trous ou des fentes étroites destinées à empêcher le passage, dans les ouvrages, des éléments fins arrachés à la formation aquifère et entraînés par le flux liquide. À la base même de cette conception, se situe un problème : une crépine est une forme de filtre. Filtrer, c'est retenir, et toute crépine qui fait son usage va vers un colmatage inexorable, sauf à imaginer des méthodes de développement du forage efficaces et/ou des technologies de crépines adaptées. Parmi ces dernières, citons les crépines à fente divergente (figure 22).

À l'opposé de cette conception, il y a lieu, au contraire, de prévoir dans la paroi captante de très larges orifices conditionnés de façon à faciliter, au début du fonctionnement de l'ouvrage intéressé, le passage des éléments fins dont il a été question tout en assurant, grâce à la prise de dispositions adéquates, la bonne tenue des terrains entourant l'ouvrage captant. La ville de Paris utilise à cet effet des buses en béton préfabriqué ou en matière plastique dont les parois sont traversées par de très larges tuyères convergentes d'entraînement ; ces dernières sont placées par leurs grandes dimensions à l'abri de toutes les causes de colmatage soit d'origine physique (arrêt des éléments fins par exemple), soit d'origine chimique (incrustations calcaires ou autres dépôts de sels ferriques qui se forment au contact de l'air avec des eaux, celles de la craie par exemple contenant du fer en dissolution sous forme d'hydrate ferreux).

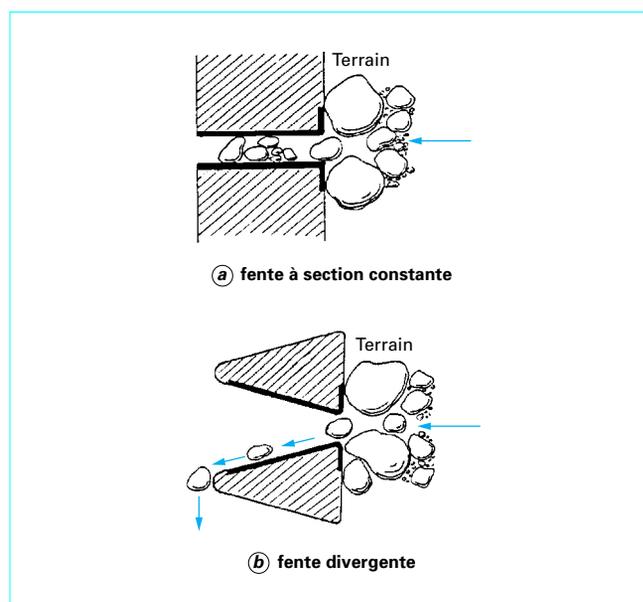


Figure 22 – Crépines

2.4.3.4.2 Développement du forage

Autour du forage, l'eau converge vers celui-ci, créant à son voisinage immédiat ce que l'on appelle une zone sensible ou critique. C'est la constitution de cette zone qu'il convient d'améliorer par ce que l'on nomme le développement. Les principales techniques utilisées sont :

- l'émulseur : pompage par émulseur alterné avec envoi d'air sous pression ;
- jets d'eau sous haute pression : lavage de la crépine par des jets à environ 50 bar ;
- pompage alterné : on crée des variations de pression brusques dans la zone sensible ;
- pompage à débit élevé : débit supérieur au débit envisagé en fonctionnement normal.

Les méthodes par alternance permettent mieux que d'autres de disloquer ce que l'on appelle les **ponts de sable**. Un bon développement permet de stabiliser la zone sensible et de classer les matériaux (figure 23). La zone autour du forage constitue un filtre efficace et peu enclin à se colmater.

2.4.3.4.3 Pompages d'essai

Le rabattement dans les puits et les forages est lié au débit pompé ainsi qu'à l'état de la nappe. Les essais préalables de débit après l'exécution de l'ouvrage déterminent la relation existant, pour un état donné de la nappe (cote du niveau supérieur non rabattu), entre le débit et le rabattement obtenu. Ces données, en tant que besoin, peuvent intervenir dans l'optimisation du choix de l'équipement de relèvement.

2.4.3.4.4 Problèmes sur les forages

Selon la nature de l'eau et du terrain, un forage présente dans les temps des problèmes :

- de colmatage mécanique (fines particules) ;
- de colmatage chimique (carbonates, oxydes du fer et du manganèse...) ;
- de colmatage bactérien (notamment les bactéries du fer et du manganèse) ;
- de corrosion (bactérienne ou électrochimique).

2.4.4 Réalimentation artificielle

La réalimentation artificielle peut être voulue ou non.

Elle peut provenir de pertes de retenues de barrage-réservoir, de canaux de navigation ou d'irrigation, elle peut être induite par une exploitation très poussée à partir d'eaux de surface ou d'une autre nappe voisine du fait de l'abaissement de la ligne piézométrique.

Elle peut au contraire être volontairement provoquée de façon à accroître une ressource souterraine dont le gestionnaire veut préserver ou accroître la production.

Les premières applications répertoriées de cette technique remontent aux années 1890 en Suède et dans la vallée de la Lee en Angleterre. Les applications se sont multipliées et perfectionnées au cours de ce siècle. Dans le cas de la réalimentation des nappes servant à des distributeurs d'eau, des prétraitements de plus en plus poussés sont développés de façon à réduire le colmatage et les risques sanitaires. Par ailleurs, les réinjections sont utilisées pour implanter des barrières liquides à pression plus élevée, notamment à proximité de la mer ou de lagunes, de façon à empêcher ou à ralentir la progression de la langue salée vers les nappes utilisées pour l'alimentation en eau potable.

2.4.4.1 Infiltration provoquée

On aménage à la surface surplombant une nappe libre, dans la tranche non saturée du terrain, des bassins (canaux et fossés) dont le fond est perméable. Ces bassins sont alimentés en eau de surface

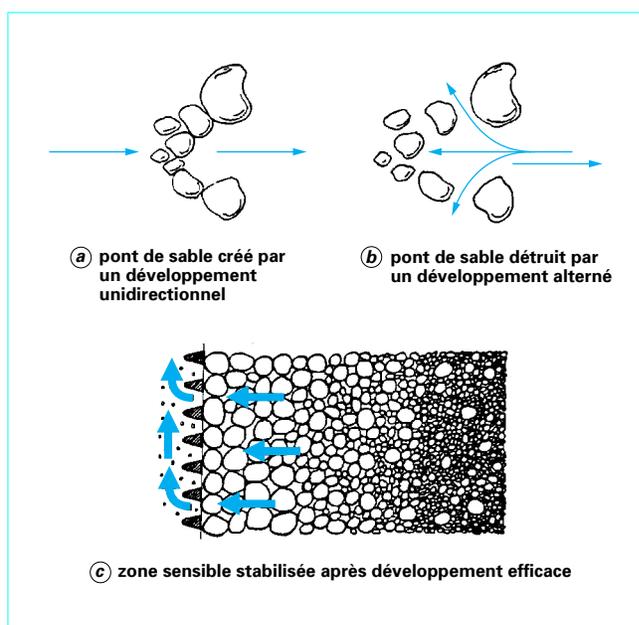


Figure 23 - Stabilisation de la zone sensible

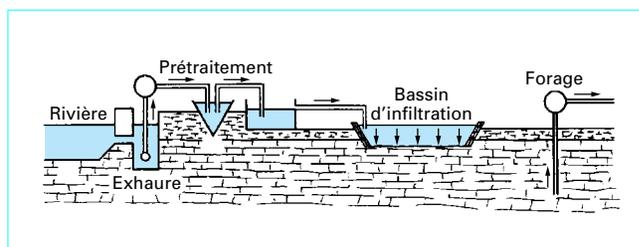


Figure 24 - Infiltration provoquée dans une nappe de calcaire fissurée

(traitée sommairement ou non traitée) qui pénètre dans le sol et parvient finalement jusqu'à la nappe à réalimenter (figure 24). Cette méthode est relativement facile à organiser à l'aide d'engins de terrassement à condition de disposer d'une surface suffisante et que la nappe soit libre, ou encore que son toit imperméable soit peu épais et facile à décapier.

Elle procure de surcroît un traitement naturel plus ou moins satisfaisant de l'eau de réalimentation au cours de la traversée du terrain situé au-dessus de la nappe. On évitera toutefois de réalimenter une nappe d'eau agressive par une eau trop incrustante par exemple : les changements d'équilibre dans les couches superficielles peuvent conduire à des colmatages irréversibles. Ce cas est heureusement peu fréquent car dans une zone géographique limitée les eaux présentent en général des caractéristiques assez voisines.

Sauf à effectuer des prétraitements aussi poussés que des traitements complets sans réalimentation (ce qui ferait perdre la quasi-totalité de l'intérêt de la réalimentation), on observera toujours un colmatage des bassins, plus ou moins rapide, plus ou moins fréquent, plus ou moins poussé, sous l'influence des matières en suspension ou colloïdales, des algues, et des bactéries. Décolmater est difficile, lourd et coûteux.

2.4.4.2 Injection provoquée

Elle permet seule la réalimentation des nappes captives mais peut servir à des nappes libres. Elle demande peu de place et permet de surcroît une surcharge de pression artificielle. Les puits d'injection sont généralement conçus comme les puits de pompage. Contrairement aux infiltrations, les forages d'injection peuvent être déterminés en débit à partir des lois classiques.

Si l'eau de surface est chargée de particules solides ou biologiques (algues, bactéries), elle peut provoquer un colmatage assez

rapide du puits d'injection ; on peut également observer un colmatage chimique sous l'effet de gonflements d'argiles par échanges ioniques. Le décolmatage est parfois plus facile que dans le cas de l'infiltration, car on peut procéder hydrauliquement en pompant dans le forage.

Un autre inconvénient réside dans les possibilités de contamination de la nappe réalimentée. Un traitement sommaire, tout au moins de désinfection, est presque toujours exigé par les autorités de contrôle.